Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission
(Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983). IAHS Publ. no. 145.

Utilisation de la télédétection pour améliorer la précision des crues de fonte de neige simulées par le modèle CEQUEAU

J. P. FORTIN, G. MORIN, W. SOCHANSKA & L. POTVIN
INRS-Eau, CP 7500, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 4C7

RESUME Des simulations des crues de fonte de neige en 1974 et 1975 avec le modèle CEQUEAU, sur un bassin québécois de 629 km^2, montrent que les erreurs de simulation ne sont pas seulement imputables aux modèles, mais aussi aux données climatologiques et nivométriques disponibles. Une première simulation, réalisée uniquement à partir de données climatologiques met en évidence une fonte légèrement trop hâtive au cours des deux années et un stock de neige trop important en 1975. La correction de la vitesse de fonte journalière est d'abord réalisée, en comparant des cartes d'équivalents en eau de la neige au sol imprimées par le modèle à des images Landsat ou NOAA-4 interprétées visuellement. Une réduction de l'équivalent en eau de la neige au sol, à l'aide des relevés nivométriques, a dû être effectuée uniquement en 1975, juste avant le début de la fonte, pour améliorer le bilan hydrologique. Les résultats obtenus confirment le potentiel de la télédétection en modélisation hydrologique.

Use of remotely sensed data to produce more accurate simulations of snowmelt floods with the CEQUEAU model
ABSTRACT Simulations of the 1974 and 1975 snowmelt floods with the CEQUEAU model, on a 629 km^2 basin in Quebec, show that simulation errors are not only due to models, but also to available climatological and snow course data. A first simulation, based on climatological data alone, is characterized by a daily snowmelt slightly too early for both years, together with an overestimated snowpack in 1975. The daily snowmelt is first corrected, by comparing maps of the water equivalents of the snowpack printed by the model, to visually interpreted Landsat or NOAA-4 imagery, for specific dates. A reduction of the water equivalent of the snowpack, using snow course data, had to be done only in 1975, just before the beginning of the snowmelt period, so as to obtain a better hydrological budget. The potential of using remotely sensed data in hydrological modelling is confirmed.

INTRODUCTION

Au Canada, l'équivalent en eau de chaque chute de neige est généralement obtenu en attribuant une densité constante (100 kg m^{-3} au Québec)

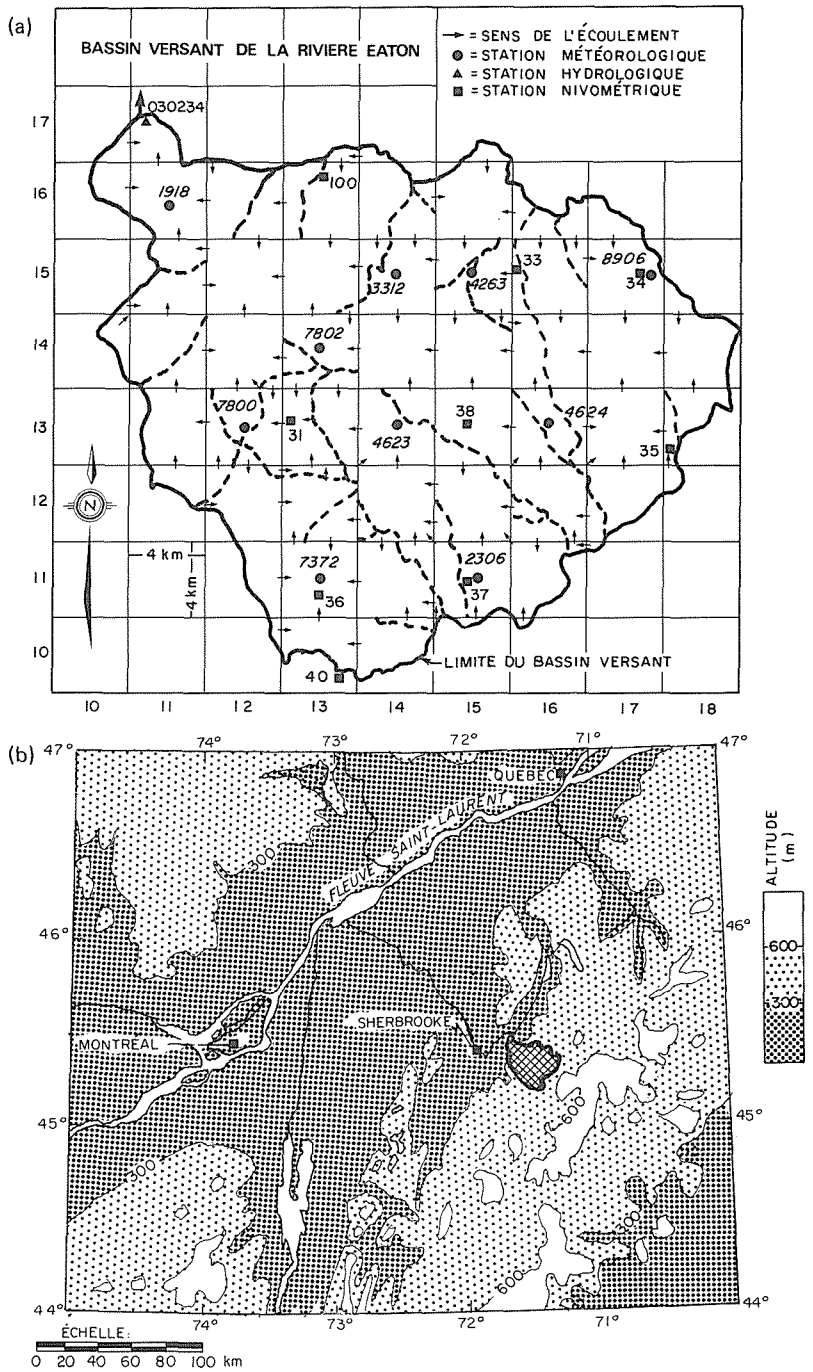

FIG.1 Le bassin de la Rivière Eaton; (a) grille CEQUEAU; (b) localisation du bassin et relief du sud du Québec.

à la hauteur correspondante mesurée à la table à neige. Des estimations significativement plus élevées ou plus faibles que les valeurs effectives du stock de neige peuvent s'en suivre, affectant

les résultats obtenus avec un modèle hydrologique. Dans le premier cas, le volume d'écoulement simulé est supérieur au volume observé et les crues ont tendance à être trop faibles au début de la fonte et trop élevées à la fin, alors que c'est l'inverse avec un stock trop faible. Pour contrôler ces estimations, l'avènement de la télédétection par satellite a permis d'avoir accès à un nouveau type de données qui peuvent s'avérer autant, sinon plus utiles, que les données classiques.

METHODOLOGIE DE L'ETUDE

Conçu pour tenir compte de la distribution spatiale des précipitations et du bilan hydrologique sur un bassin a l'aide d'une grille carrée, le modèle hydrologique CEQUEAU (Charbonneau *et al.*, 1977; Morin *et al.*, 1981) offre la possibilité de présenter des cartes de l'équivalent en eau du stock de neige, sur chacun des carreaux du bassin étudié (Fig.1(a)). Les comparaisons avec des informations spatiales indépendantes (télédétection, relevés nivométriques) en sont ainsi facilitées.

L'idée de base de l'étude a consisté à appliquer le modèle au bassin de la Rivière Eaton, qui s'étend sur 629 km^2 dans le sud du Québec (Fig.1(b)), pour en simuler les débits en utilisant, dans un premier temps, uniquement les données recueillies aux stations climatologiques. Par la suite, des modifications ont été apportées tant aux valeurs de certains paramètres du modèle qu'aux stocks de neige, à l'aide de la télédétection et des relevés nivométriques, pour améliorer la simulation des débits.

SIMULATION A PARTIR DES STATIONS CLIMATOLOGIQUES SEULEMENT

Nous avons choisi de simuler les débits des années 1974 et 1975, pour lesquelles nous avions les divers types de données désirées, en utilisant tout d'abord les valeurs des paramètres déterminées précédemment à partir de données climatologiques et hydrométriques uniquement (Morin *et al.*, 1981). Ces années sont différentes l'une de l'autre. On observe quatre crues provenant de la pluie et de la fonte combinées en 1974, et une seule en 1975, due surtout à la fonte de neige. Il en résulte un écoulement saisonnier deux fois plus élevé en 1974 qu'en 1975 (Tableau 1).

En 1974, la simulation des débits est relativement bonne, la crue de mars étant surestimée et la dernière crue d'avril sous-estimée (Fig.2). La lame calculée ne s'écarte que de 3.8% de la lame observée (Table 1); la lame observée est surestimée en février et mars alors qu'elle est sous-estimée en avril et mai. En 1975, la lame totale simulée est de 18.1% supérieure à la lame observée (Tableau 1), toutes les crues étant surestimées, surtout en avril (Fig.3).

COMPARAISON DES DONNEES CLIMATOLOGIQUES ET DES DONNEES NIVOMETRIQUES

Ce qui ressort le plus de la première simulation, c'est l'excédent

TABLEAU 1 Comparaison des lames mensuelles observées, Lo, et calculées, Lc (mm)

Essai		Fév	Mars	Avril	Mai	Total saison	Ecart (%)
1974							
Obs.	Lo	34.70	68.30	276.23	132.15	511.38	
No.1	Lc	42.95	93.88	243.70	111.68	492.21	
	Lc - Lo	8.25	25.58	-32.53	-20.47	-19.17	3.8
No.2	Lc	34.82	74.14	277.65	115.47	502.08	
	Lc - Lo	0.12	5.84	1.42	-16.68	-9.30	1.8
1975							
Obs.	Lo	10.48	71.97	126.59	60.90	269.94	
No.1	Lc	28.13	71.03	170.62	48.96	318.74	
	Lc - Lo	17.65	-0.94	44.03	-11.94	48.80	18.1
No.2	Lc	18.45	48.64	160.26	97.37	324.72	
	Lc - Lo	7.97	-23.32	33.67	36.47	54.78	20.3
No.3	Lc	18.45	57.18	153.84	45.52	274.99	
	Lc - Lo	7.97	-15.69	28.26	-14.48	6.06	2.3

d'écoulement qui provient d'un stock de neige trop important au moment de la fonte, en 1975. Effectivement, le 15 janvier 1975, les équivalents en eau calculés en forêt par le modèle sur chaque carreau où existe une station nivométrique sont déjà nettement supérieurs aux valeurs observées, dont la moyenne est légèrement inférieure à 40 mm (Tableau 2 et Fig.4(a)).

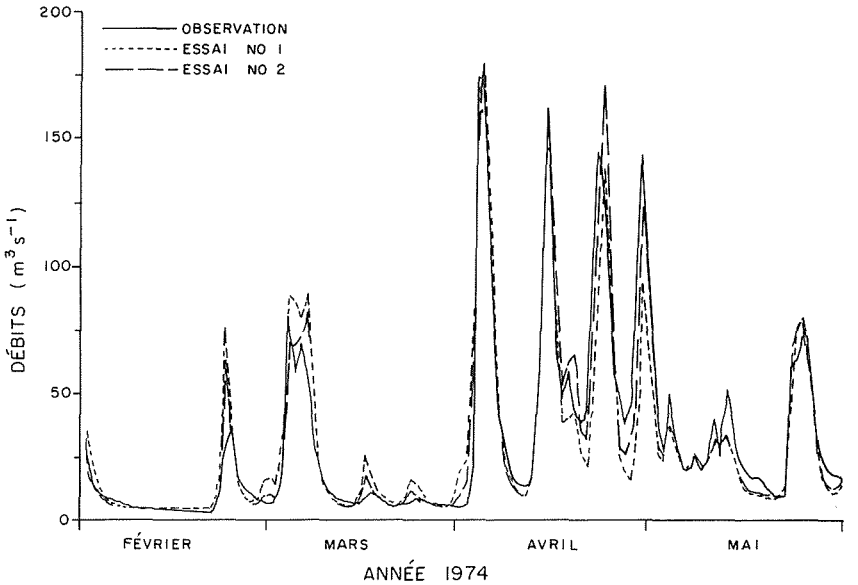

FIG.2 Débits observés et simulés sur la Rivière Eaton à la station 030234 au printemps 1974.

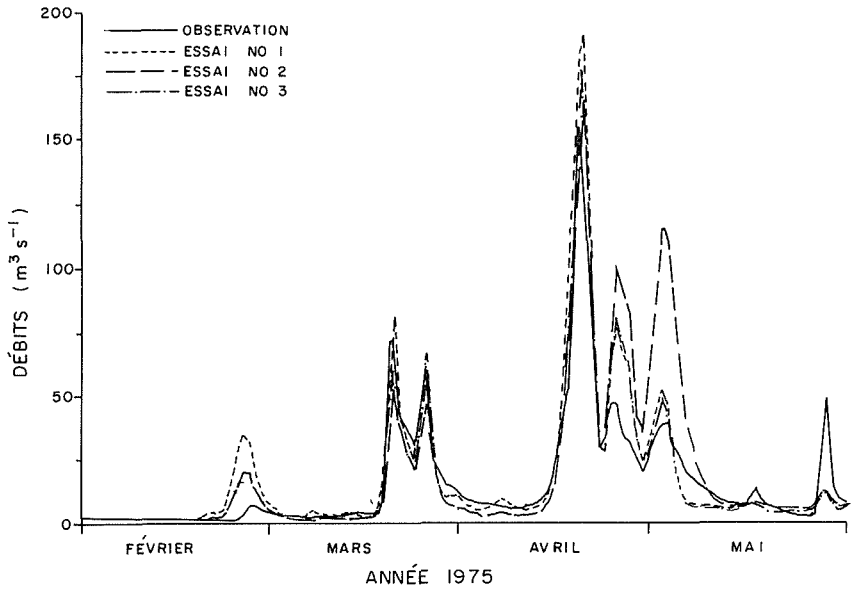

FIG.3 Débits observés et simulés sur la Rivière Eaton à la station 030234 au printemps 1975.

TABLEAU 2 Equivalents en eau (mm) aux stations nivométriques en 1975, sur le bassin de la Rivière Eaton

No.	*Nom*	*Altitude (m)*	*Dates: 15/1*	*19/2*	*19/3*	*2/4*	*16/4*	*30/4*
31	*Sawyerville North*	*220*	*36*	*114*	*155*	*117*	*112*	*0*
33	*Pine Brook North*	*465*	*43*	*127*	*196*	*157*	*175*	*43*
34	*West Ditton*	*488*	*48*	*152*	*226*	*178*	*229*	*79*
35	*Bellefeuille*	*571*	*46*	*145*	*211*	*173*	*229*	*102*
36	*East Clifton North*	*450*	*38*	*132*	*132*	*137*	*157*	*0*
37	*Eaton Second Branch*	*495*	*30*	*127*	*163*	*130*	*175*	*0*
38	*Maple Leaf*	*389*	*30*	*102*	*142*	*99*	*114*	*0*
40	*Saint-Malo*	*564*	*25*	*107*	*119*	*124*	*140*	*0*
100	*Bury*	*335*	*30*	*112*	*185*	*170*	*170*	*0*

Parmi les causes possibles de cet écart, on peut mentionner la surestimation de la hauteur réelle des chutes de neige aux stations climatologiques, une densité réelle de la neige fraîche inférieure à 100 kg m^{-3} et la possibilité que la fonte simulée depuis le début de l'hiver soit trop faible, laissant un stock de neige trop élevé au sol. Il faut aussi s'interroger sur la précision et la représentativité des relevés nivométriques.

La période du 15 janvier au 19 février 1975, entre deux relevés nivométriques consécutifs, étant caractérisée par des températures froides, la fonte est nulle. On peut ainsi éliminer les causes d'erreur attribuables au modèle, et s'attacher uniquement à celles qui sont dues aux données. Au cours de cette période, les estimations

de l'augmentation de l'équivalent en eau de la neige au sol fournies par les données climatologiques diffèrent de plus de 20% dans certains cas (Fig.4(b)) de celles des relevés nivométriques. Si l'on considère les relevés nivométriques comme représentatifs des conditions d'enneigement, les résultats des Fig.4(a) et (b) démontrent que les données climatologiques peuvent être responsables d'une partie importante des erreurs de simulation et qu'il faut par conséquent pouvoir les corriger judicieusement.

La représentativité des relevés de neige n'est toutefois pas toujours assurée. Ainsi, du 19 février au 19 mars 1975, les stations nivométriques 36 et 40 ont un comportement très différent des autres (Fig.4(b)). Les relevés à ces stations ayant effectivement été recueillis le 20 mars, la fonte de 10 mm produite du 19 au 20 peut être responsable d'une partie de l'écart, mais cela ne suffit pas à expliquer les différences. Par ailleurs, les valeurs correspondantes provenant du modèle sont elles aussi beaucoup plus élevées que celles des stations 36 et 40, alors qu'elles ne s'écartent pas de plus de 20 mm des relevés à cinq des neuf stations. Il importe donc d'utiliser les relevés nivométriques avec précaution en portant une attention particulière à leur représentativité spatiale. L'utilisation de données complémentaires s'avère par conséquent souhaitable.

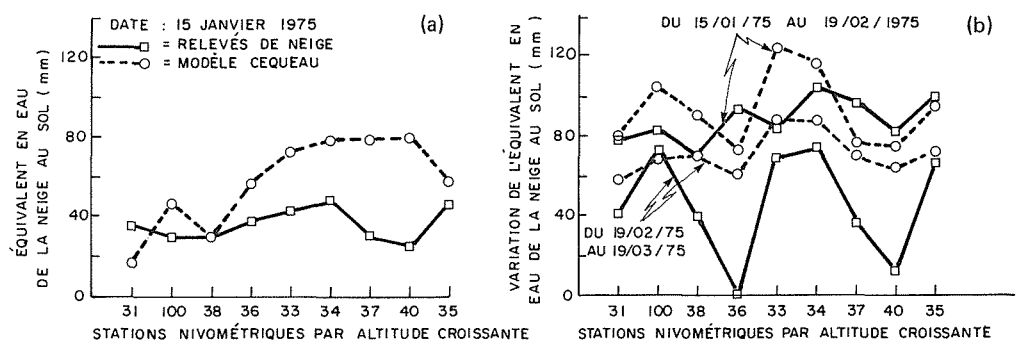
DATE : 15 JANVIER 1975
= RELEVÉS DE NEIGE
= MODÈLE CEQUEAU
(a)
ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE AU SOL (mm)
0
40
80
120
31 100 38 36 33 34 37 40 35
STATIONS NIVOMÉTRIQUES PAR ALTITUDE CROISSANTE
DU 15/01/75 AU 19/02/1975
(b)
VARIATION DE L'ÉQUIVALENT EN EAU DE LA NEIGE AU SOL (mm)
DU 19/02/75
AU 19/03/75
31 100 38 36 33 34 37 40 35
STATIONS NIVOMÉTRIQUES PAR ALTITUDE CROISSANTE

FIG.4 Comparaison des équivalents en eau calculés par le modèle CEQUEAU et des relevés recueillis aux stations nivométriques.

COMPARAISON ENTRE LES CARTES D'EQUIVALENT EN EAU DU STOCK DE NEIGE AU SOL PRODUITES PAR LE MODELE ET LES IMAGES LANDSAT ET NOAA-4 CORRESPONDANTES

Compte tenu des images disponibles, nous avons utilisé des images des satellites Landsat et NOAA-4 dont les caractéristiques sont abondamment citées dans la littérature (Rango, 1977; Bowley *et al.*, 1981).

Comme il est encore (en 1983) plus facile d'avoir accès à des produits photographiques en temps presque réel qu'à des données digitales, la cartographie du couvert nival a été réalisée avec des moyens très simples, à partir de photographies. Par ailleurs, l'interprétation visuelle de l'imagerie satellite, dans le cas de la neige, est préférée par plusieurs au traitement de données numériques

par ordinateur (Rango, 1977; Bowley *et al.*, 1981). Toutefois, un nombre croissant d'auteurs utilisent des données numériques (Lillesand *et al.*, 1982; Rochon *et al.*, 1983).

En 1974, une image Landsat était disponible le 20 avril, au cours de la période de fonte intensive. A l'aide d'un rétroprojecteur, nous avons projeté sur une carte du bassin une diapositive couleur (bandes 4, 5 et 7), à l'échelle du 1:1 000 000. Nous avons ainsi identifié une zone complètement dégagée de neige (en gris foncé sur la bande MSS-5 à la Fig.5(a), une zone de transition recouverte de neige en forêt seulement (en gris plus clair, avec des contrastes internes très atténués) et enfin une zone avec un couvert de neige en forêt et en terrain déboisé (en blanc). Les limites de ces zones sont reproduites sur les cartes d'équivalents en eau imprimées par le modèle CEQUEAU, dont la présentation a été améliorée pour faciliter les comparaisons (Fig.5(b) et (c)).

La carte CEQUEAU de la Fig.5(b) ne contient que deux zones, la zone complètement dégagée et la zone partiellement dégagée de neige. La superficie couverte de neige est plus faible que sur l'image Landsat. Cette différence peut être due à une fonte trop rapide dans

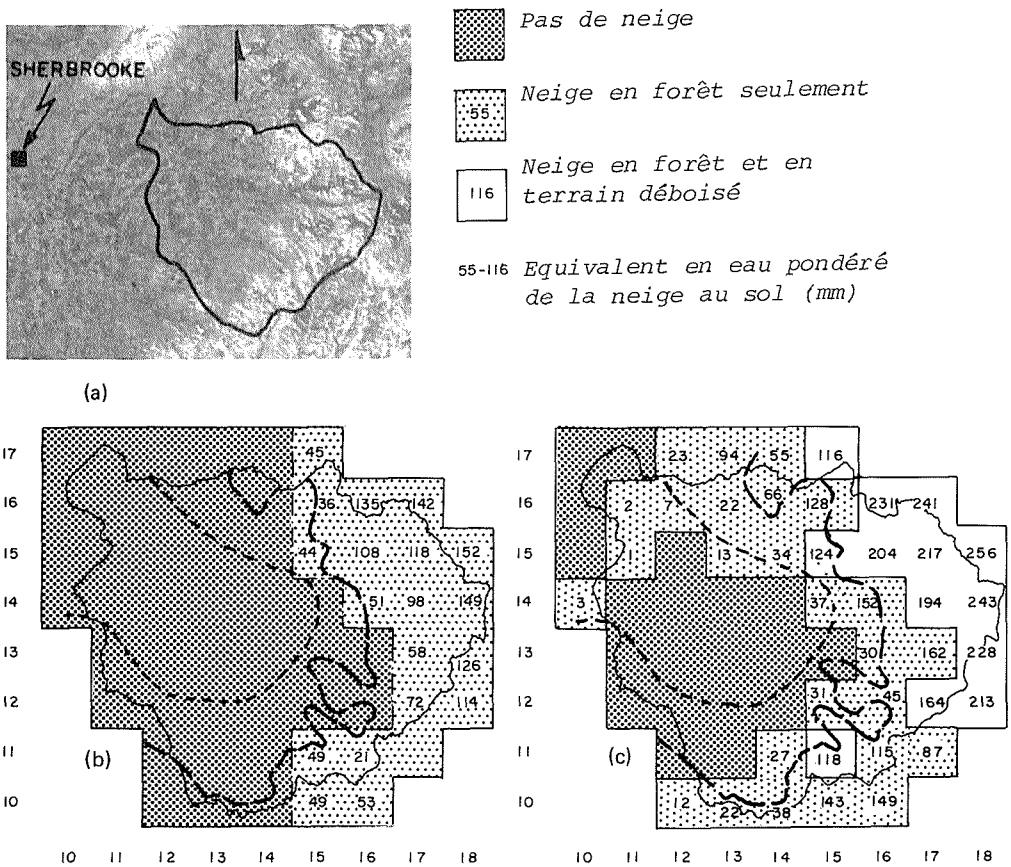

FIG.5 Distribution de la neige au sol sur le bassin de Rivière Eaton, le 20 avril 1974, selon l'image Landsat (MSS-5) et le modèle CEQUEAU; (a) Image Landsat CCRS E-1636-15002-5; (b) essai 1; (c) essai 2.

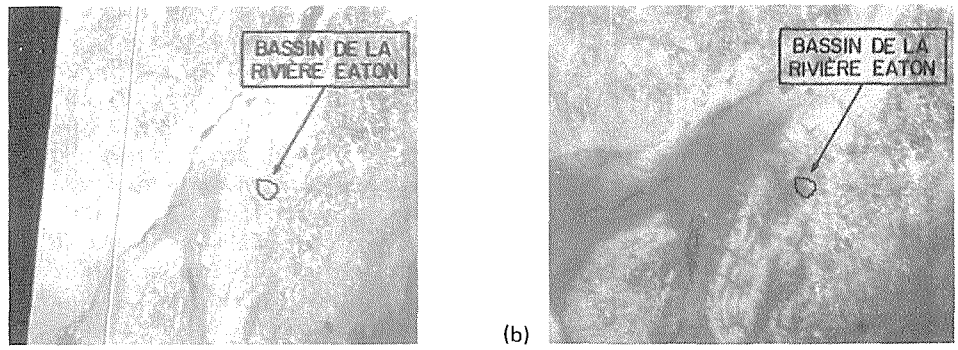

FIG.6 Progression de la fonte de neige dans le sud du Québec, selon les images NOAA-4 des 17 et 22 avril 1975. (a) orbite 1914, le 17 avril 1975 (distorsion géométrique importante); (b) orbite 1977, le 22 avril 1975.

le modèle ou à un manque de neige. Comme le bilan hydrologique est relativement bon (Tableau 1), les renseignements fournis par télédétection confirment que l'on devrait considérer une réduction de la vitesse de la fonte.

Bien que la résolution spatiale des images NOAA-4 dans le visible soit beaucoup plus faible que celle des images Landsat, une interprétation visuelle de ces images a pu être réalisée en avril 1975, à l'aide du relief de la région (Fig.1(a)). Le 17, le bassin est encore complètement couvert de neige (Fig.6(a)). Par ailleurs, les Fig. 6(b) et 7(a) nous incitent à croire que le 22, la partie inférieure du bassin est partiellement ou complètement dégagée de neige et que le 30, seules les parties les plus élevées en sont encore recouvertes.

La carte produite par le modèle CEQUEAU pour le 30 avril 1975 (Fig.7(b)), indique pour sa part que la neige a complètement disparu en terrain déboisé, mais qu'il reste de la neige en forêt, sur près de la moitié du bassin. Comme l'analyse des données de 1974 indique qu'il serait souhaitable de retarder la fonte, cette constatation suggère une surestimation du stock de neige en 1975.

MODIFICATION DES VALEURS DES PARAMETRES DE FONTE DU MODELE CEQUEAU

Des essais ont d'abord été réalisés afin d'observer l'effet d'un ralentissement de la fonte, estimée par la méthode des degrés-jours, sur les lames mensuelles, les débits journaliers et la distribution de la neige au sol aux dates désirées. Les meilleurs résultats ont été obtenus en diminuant les taux de fonte en forêt et en terrain déboisé, respectivement de 3.5 à 3.0 et de 4.0 à 3.5 mm $^{\circ}C^{-1}$ j^{-1}, et en remontant légèrement le seuil de fonte en terrain déboisé de -3°C à -2°C.

La carte CEQUEAU produite le 20 avril 1974 (Fig.5(c)) compte maintenant trois zones. La distribution spatiale de ces zones correspond beaucoup mieux à celles qui sont identifiées sur l'image Landsat (Fig.5(a)).

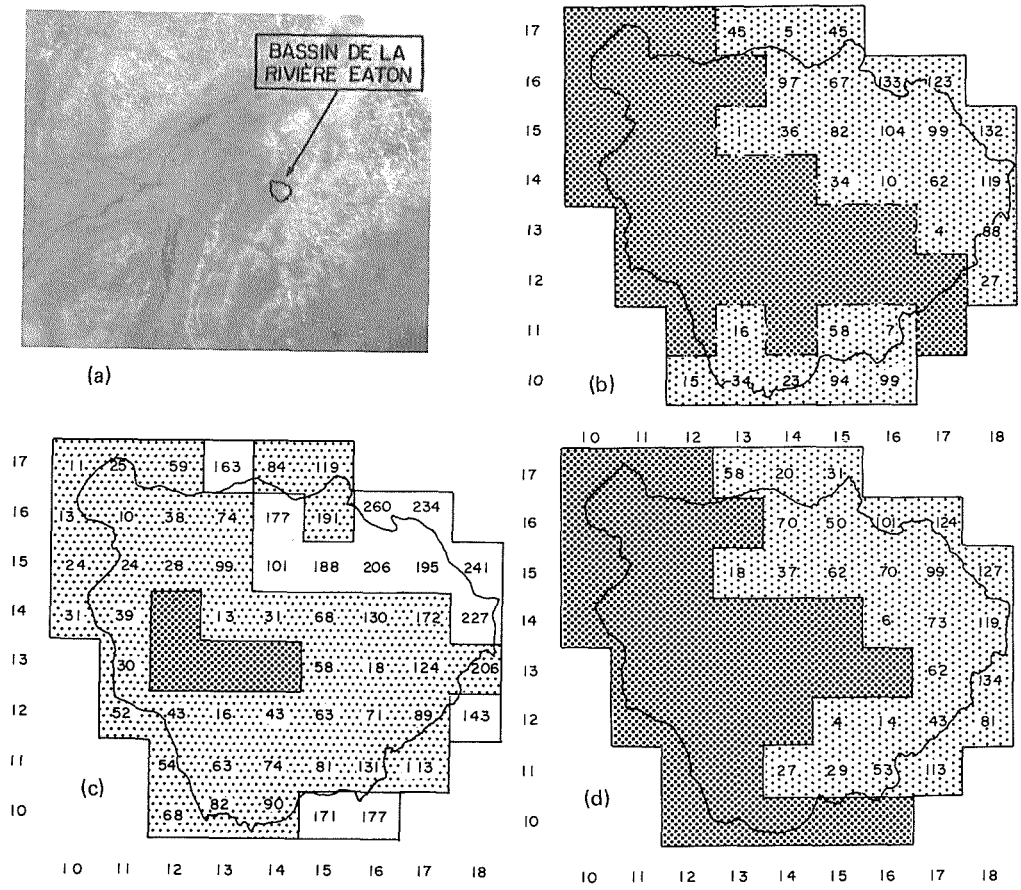

FIG.7 Distribution de la neige au sol sur le bassin de la Riviere Eaton, le 30 avril 1975, selon l'image NOAA-4 et le modele CEQUEAU. (a) orbite 2077, le 30 avril 1975; (b) equivalent en eau (mm) de la neige au sol (essai 1); (c) equivalent en eau (mm) de la neige au sol (essai 2); (d) equivalent en eau (mm) de la neige au sol (essai 3).

On note également une meilleure simulation de l'écoulement saisonnier, de la distribution des lames mensuelles, particulièrement en mars et avril (Tableau 1), ainsi que de trois des quatre crues d'avril (Fig.2).

En 1975, la carte CEQUEAU du 30 avril (Fig.7(c)) confirme qu'il reste manifestement trop de neige sur le bassin, par rapport à l'image NOAA-4. Cette observation est corroborée par la lame saisonnière (+20.3%) et sa distribution mensuelle (Tableau 1), ainsi que par les débits journaliers (Fig.3), les dernières crues de fonte étant beaucoup trop élevées.

MODIFICATION DE L'EQUIVALENT EN EAU DU STOCK DE NEIGE AU PRINTEMPS 1975

Compte tenu des résultats obtenus en ralentissant la fonte de la

neige nous avons procédé à une simulation supplémentaire visant à illustrer l'effet d'une diminution du stock de neige sur les débits simulés et la distribution de la neige au sol le 30 avril. Pour ce faire, nous avons utilisé les données nivométriques recueillies les 19 et 20 mars 1975 (Tableau 2), juste avant la première crue de printemps. Rappelons que les valeurs mesurées aux stations 36 et 40 sous-estiment probablement le stock de neige présent dans le sud du bassin.

Suite à cette réduction du stock de neige, la distribution spatiale de la neige au sol le 30 avril 1975 s'accorde mieux que la précédente avec l'image NOAA-4 (Fig.7(d)). De même, l'écart entre la lame saisonnière calculée et la lame observée est réduit de 18.1 à 2.2%, les écarts mensuels demeurant toutefois importants. Quant aux débits journaliers calculés, leur amélioration se fait surtout sentir à la fin d'avril et au début de mai (Fig.3). Compte tenu des dimensions du bassin (Fig.7(d)) et de l'échelle des images NOAA-4 utilisée, nous considérons avoir atteint la limite de ce que peut apporter l'interprétation visuelle de ces images. Selon nous, le contrôle de la distribution spatiale de la neige au sol résultant d'une nouvelle réduction du couvert nival n'aurait été vraiment possible qu'en utilisant des données numériques (Rochon *et al.*, 1983).

CONCLUSION

Les cartes produites par le modèle CEQUEAU se sont avérées d'une grande utilité pour faciliter la comparaison avec l'imagerie satellite, permettant ainsi d'améliorer le calage du modèle et de contrôler l'effet de la correction du stock de neige, sur les débits.

Des recherches devront cependant être poursuivies tant au niveau de l'interprétation visuelle que du traitement numérique de l'imagerie satellite, non seulement dans le visible, mais aussi dans l'infra-rouge thermique et les micro-ondes. D'autres caractéristiques du couvert nival, la température de surface de la neige et l'équivalent en eau du stock pourront ainsi être détectées et utilisées pour obtenir de meilleures simulations. Il est aussi souhaitable que le développement de modèles aptes à utiliser tout le potentiel de la télédétection soit encouragé.

REMERCIEMENTS Ces travaux ont été réalisés grâce à une subvention du CRSNG (Canada) portant le numéro A-1806.

REFERENCES

Bowley, C.J., Barnes, J.C. & Rango, A. (1981) Application systems verification and transfert project, vol. VIII: Satellite snow mapping and runoff prediction handbook. *NASA Tech. Pap. 1829*.

Charbonneau, R., Fortin, J.P. & Morin, G. (1977) The CEQUEAU model: description and examples of its use in problems related to water resources management. *Hydrol. Sci. Bull.* 22 (1), 193-202.

Lillesand, T.M., Meisner, D.E., LaMois Downs, A. & Dewell, R.L. (1982) Use of GOES and TIROS/NOAA satellite data for snowcover

mapping. *Photogramm. Engng & Rem. Sensing* 48 (2), 251-259.

Morin, G., Fortin, J.P., Lardeau, J.P., Sochanska, W. & Paquette, S. (1981) Modèle CEQUEAU: manuel d'utilisation. *INRS-Eau, Rapp. Sci.* no. 93.

Rango, A. (1977) Remote sensing: snow monitoring tool for today and tomorrow. In: *Western Snow Conf.* (April 1977), 75-81.

Rango, A. (editor) (1980) Microwave remote sensing of snowpack properties. *NASA Conference Publ. 2153.*

Rochon, G., Bénié, G.B., Fortin, J.P. & Dupont, J. (1983) Cartographie du couvert nival à l'aide de données numériques NOAA-6 et application dans le modèle hydrologique CEQUEAU. Présenté au 8e Symposium Canadien de télédétection, Montréal, Québec, 3-6 mai, 1983.